

# 浅谈长度计量技术及其发展趋势

于倩 郭超 郭亮

内蒙古自治区计量测试研究院 内蒙古 呼和浩特 010000

**摘要:** 长度计量技术作为现代工业的基础支撑,经历了从机械测量到量子计量的重要发展。本文系统梳理机械测量、光学测量、电磁测量及量子计量等主要方法的原理与特点,分析当前技术的高精度、动态实时、多维复合及智能化等核心特征。重点探讨长度计量技术向更高精度、跨学科融合、智能化网络化及绿色可持续发展的重要趋势,为相关领域技术升级与创新应用提供重要参考。

**关键词:** 长度计量; 测量精度; 光学测量; 智能化; 可持续发展

引言: 长度计量作为基础性技术,在工业生产、科学研究、日常生活等众多领域意义重大非凡。从古老简单的测量工具到如今融合多学科的高精度设备,其发展历程见证了人类对精准测量的不懈追求。随着科技飞速发展,各领域对长度计量精度、速度、功能等提出更高要求。在此背景下,深入探讨长度计量技术的主要方法、核心特点及发展趋势,具有重要的现实意义。

## 1 长度计量技术的主要方法与原理

### 1.1 机械测量法

机械测量法是长度计量领域中历史悠久且应用广泛的一类方法。游标卡尺作为经典的机械测量工具,通过主尺和游标尺上刻线的间距差来实现精确测量,普通游标卡尺精度可达0.02毫米,高精度游标卡尺则能达到0.01毫米。当游标尺移动使某刻线与主尺刻线对齐时,根据对齐刻线的编号与间距差即可计算出测量长度<sup>[1]</sup>。千分尺则利用螺旋副传动原理,测微螺杆的螺距通常为0.5毫米,通过旋转测微螺杆使测砧与工件接触,螺杆转动的圈数与螺距的乘积即为测量长度,其精度普遍可达0.001毫米,能实现微小长度的精确测量。然而,机械测量法存在一定精度限制。由于机械结构存在制造误差、磨损以及受温度、湿度等环境因素影响,测量精度通常在微米级别,最高难以突破0.1微米。这种测量方法适用于对精度要求不是极高、测量环境相对稳定的场景,如普通机械加工零件的尺寸测量、五金制品的长度检测等,能快速、方便地获取测量结果。

### 1.2 光学测量法

光学测量法凭借其非接触、高精度的特点在长度计量中占据重要地位。激光干涉仪利用激光的干涉现象进行测量,常用氦氖激光的波长为632.8纳米。当两束相干激光相遇产生干涉条纹,测量对象移动引起光程差变化时,干涉条纹会随之移动。通过检测条纹移动数量和

已知激光波长,可精确计算位移距离,其测量精度可达0.001微米。光栅尺则基于光栅的莫尔条纹原理,光栅栅距通常为20微米至100微米。标尺光栅与指示光栅相对移动时产生明暗相间的莫尔条纹,通过对条纹计数和细分处理,可实现0.1微米级的高精度测量。值得注意的是,光学测量法不会对被测物体造成损伤,且分辨率可达纳米级别,适用于对精度要求极高或不宜接触的测量场景,例如半导体芯片制造中的晶圆尺寸测量要求精度不超过0.5微米,以及精密光学元件的表面形貌检测。这些优势使其成为现代精密制造领域不可或缺的关键技术。

### 1.3 电磁测量法

电磁测量法利用电磁感应原理进行长度计量。感应同步器通过定尺和滑尺之间的电磁耦合,定尺长度通常为250毫米至1000毫米,当滑尺相对定尺移动时,感应电动势会发生变化,根据电动势的变化规律可确定移动的距离,其测量精度可达0.2微米。磁栅尺则利用磁性标尺和磁头之间的磁信号变化来测量长度,磁栅的磁距一般为0.05毫米或0.1毫米,磁头读取磁性标尺上的磁信号,经过处理后得到长度信息,分辨率可达到0.1微米。电磁测量在动态环境下具有独特的应用特点,响应频率可达1000赫兹以上,能快速响应被测物体的运动变化,适用于需要实时监测长度变化的动态场景,如数控机床的位移测量、机器人关节的运动检测等。

### 1.4 量子计量与纳米技术

量子计量基于原子跃迁等量子现象建立长度标准。激光冷却原子干涉仪利用激光冷却技术将原子冷却至极低温度,使原子处于量子态,通过原子干涉现象实现高精度的长度测量,为长度计量提供了全新的、更高精度的标准。激光冷却原子干涉仪可将原子冷却至纳开尔文(nK)量级,在这种极低温度下,原子的热运动几乎被抑制,能够实现原子级精度的长度测量,其测量精度可

达到 $10^{-12}$ 米量级。纳米尺度下的扫描探针显微镜技术能在纳米级别对物体表面进行成像和测量。通过探针与样品表面的相互作用,如原子间作用力等,探针在样品表面扫描时会引起微小变化,检测这些变化可获取样品表面的形貌和尺寸信息,在纳米材料研究、微电子器件制造等领域发挥着关键作用。扫描探针显微镜的探针针尖曲率半径可小至几个纳米,其横向分辨率可达 $0.1\text{nm}$ ,纵向分辨率可达 $0.01\text{nm}$ ,能够清晰地观察到纳米材料的微观结构。

## 2 当前长度计量技术的核心特点

### 2.1 高精度与高分辨率

现代长度计量技术已突破传统局限,实现了亚微米甚至纳米级的测量能力。这一突破得益于多种先进技术的融合应用。在光学领域,激光干涉仪凭借激光的高相干性和稳定性,能对极微小的长度变化进行精准捕捉<sup>[2]</sup>。通过不断优化激光光源和干涉系统设计,测量精度持续提升,可精确到纳米级别,满足半导体制造、精密光学加工等对精度要求极高的行业需求。在半导体制造中,光刻工艺对线宽的控制要求极高,长度计量技术的精度需达到 $\pm 0.5\text{nm}$ 以内,以确保芯片的性能和集成度。在电磁测量方面,感应同步器和磁栅尺等设备通过改进信号处理算法和提高磁性材料性能,也具备了亚微米级的测量分辨率,为高精度机械加工和自动化生产线提供了可靠的测量保障。在高精度机械加工中,电磁测量设备的测量分辨率可达到 $0.05\mu\text{m}$ ,能够满足精密零部件的加工精度要求。

### 2.2 动态与实时测量能力

随着工业生产向高速、高效方向发展,对长度计量技术的动态与实时测量能力提出了更高要求。在线检测技术应运而生,它能在生产过程中实时获取产品的尺寸信息,无需将产品从生产线上取下进行单独测量。例如在汽车制造流水线上,激光扫描系统可对车身零部件进行快速扫描,实时反馈尺寸数据,一旦发现偏差能立即调整生产工艺,确保产品质量稳定。汽车车身零部件的尺寸公差通常要求在 $\pm 0.2\text{mm}$ 以内,激光扫描系统可在每分钟扫描数百个零部件的速度下,实时提供尺寸数据,保证生产质量。对于高速运动物体的测量,先进的传感器技术和高速数据采集系统发挥了关键作用。这些系统能在极短时间内完成数据采集和处理,准确测量高速旋转零件的直径、高速移动物体的位移等,为航空航天、高速列车等领域的研发和生产提供了有力支持。在航空航天领域,发动机叶片在高速旋转时的振动位移测量精度要求达到 $\pm 0.01\text{mm}$ ,高速数据采集系统可在每秒采集数

千个数据点的速度下,满足测量需求。

### 2.3 多维度与复合测量

单一维度的长度测量已无法满足复杂形状和表面特征的测量需求,多维度与复合测量技术应运而生。三维形貌测量技术能全面获取物体表面的三维坐标信息,通过激光扫描、结构光投影等方法,构建出物体的精确三维模型,广泛应用于文物修复、逆向工程等领域。在文物修复中,三维形貌测量技术可精确获取文物的三维尺寸和表面形貌,测量精度可达 $\pm 0.05\text{mm}$ ,为文物的修复和保护提供详细的数据支持。表面粗糙度分析技术则可对物体表面的微观不平度进行量化评估,结合高分辨率的测量仪器和先进的算法,能精确分析不同加工工艺对表面粗糙度的影响,为优化加工参数提供依据。在机械加工中,表面粗糙度的测量范围通常在 $\text{Ra}0.01\text{-Ra}10\mu\text{m}$ 之间,先进的表面粗糙度分析技术可实现 $\pm 0.001\mu\text{m}$ 的测量精度,帮助企业优化加工工艺,提高产品质量。

### 2.4 自动化与智能化集成

计算机辅助设计与测量系统的融合,实现了测量过程的自动化和智能化。测量软件可与CAD模型进行无缝对接,根据设计要求自动规划测量路径和采样点,提高测量效率和准确性。在自动化测量过程中,测量软件规划测量路径的时间可缩短至几秒,采样点数量可根据测量需求精确设置,提高测量效率数倍。人工智能技术在数据处理与误差补偿方面发挥着重要作用。通过对大量测量数据的学习和分析,人工智能算法能自动识别测量过程中的误差模式,并进行实时补偿,有效提高测量结果的可靠性。在复杂零件的测量中,人工智能算法可对测量数据进行实时分析,误差补偿精度可达 $\pm 0.02\text{mm}$ ,显著提高测量结果的准确性。

## 3 长度计量技术的发展趋势

### 3.1 向更高精度与极限尺度突破

长度计量技术正朝着追求原子级、量子级测量精度的方向大步迈进。在微观世界,原子和量子层面的长度变化极其微小,却蕴含着巨大的科学价值和应用潜力。通过利用原子跃迁的稳定频率作为长度基准,结合先进的激光冷却和干涉技术,有望实现原子级精度的长度测量,为纳米科技、量子计算等前沿领域提供更精确的测量手段<sup>[3]</sup>。在极限尺度方面,极端环境下的计量技术成为研究热点。超高温环境下,材料的热膨胀和变形会对长度测量产生显著影响,研发能在超高温下稳定工作的测量传感器和测量方法,对于航空航天发动机制造、核能开发等领域至关重要。超低温环境同样面临挑战,低温下材料的物理性质发生改变,需要开发适应超低温

的测量技术,以满足低温物理实验、超导技术研究等的需求。

### 3.2 跨学科融合与创新

长度计量技术与光学、电子、材料科学的交叉应用日益广泛。光学技术为长度计量提供了高精度、非接触的测量手段,而电子技术的发展则推动了测量仪器的智能化和数字化。材料科学的进步为制造高性能的测量传感器和光学元件提供了可能。例如,新型光学材料的研发可提高激光干涉仪的测量精度和稳定性,先进的电子芯片技术可实现测量数据的快速处理和传输。生物计量、微流控等新兴领域也为长度计量技术带来了新的发展机遇。生物计量关注生物体内微观结构的长度测量,如细胞尺寸、DNA长度等,对生物医学研究和疾病诊断具有重要意义。微流控技术在芯片实验室中实现对微量液体的精确操控和测量,长度计量技术为其提供了关键的尺寸测量保障。

### 3.3 智能化与网络化升级

物联网与云计量技术的结合将推动长度计量技术向智能化、网络化方向升级。通过在测量设备中嵌入物联网模块,实现设备之间的互联互通和数据实时传输。测量数据可上传至云端,利用云计算强大的计算能力进行数据处理和分析,为用户提供更全面、准确的测量结果。基于人工智能的智能诊断系统能够自动识别测量过程中的异常数据,并给出相应的处理建议,大大提升了测量的可靠性和效率。远程校准与数据共享平台的构建是网络化升级的重要体现。用户可通过网络将测量设备连接到远程校准中心,实现设备的远程校准,节省时间和成本。区块链技术的引入为测量数据的可信存储和溯源提供了新的解决方案,确保了数据的真实性和不可篡改性。数据共享平台则促进了测量数据的交流和共享,不同地区、不同行业的用户可获取所需的测量数据,推动长度计量技术的协同发展。未来,随着5G/6G通信技术的普及,测量设备之间的实时协同和远程控制将达到新

的水平。

### 3.4 绿色与可持续发展方向

低能耗、环保型测量设备的研发成为长度计量技术发展的重要趋势。传统的测量设备往往能耗较高,且部分材料可能对环境造成污染。研发新型的低能耗测量电路和环保型材料,降低测量设备的能源消耗和环境影响,符合绿色发展的理念。例如,采用能量采集技术的自供电传感器,可从环境中采集光能、热能或机械能,实现测量的能源自给。计量技术对循环经济的支持作用也日益凸显。在资源回收利用过程中,精确的长度测量可帮助确定材料的尺寸和形状,提高资源回收的效率和质量。通过高精度的三维扫描和材料识别技术,可实现废弃产品的快速分类和精准拆解,大幅提升资源再利用率。在产品设计和制造阶段,通过精确的长度计量优化产品结构,减少材料浪费,推动循环经济的发展。此外,生命周期评估方法的引入,使得可以从全生命周期的角度评估测量技术对环境的影响,为开发更环保的测量方案提供指导。

### 结束语

长度计量技术历经发展,已形成丰富多样的测量方法,具备诸多核心优势。未来,在追求更高精度、突破极限尺度、跨学科融合、智能化网络化升级以及绿色可持续发展等趋势引领下,长度计量技术将不断革新。这不仅为各领域提供更强大支撑,也将推动整个计量行业迈向新高度,助力人类在科技探索与生产实践中取得更多突破。

### 参考文献

- [1]秦颖.浅谈长度计量仪器测量过程中的误差控制[J].数字化用户,2024(33):41-42.
- [2]于佃清.浅谈长度计量检定中温度的影响及对策[J].市场调查信息,2023(5):27-29.
- [3]闫敏.长度计量仪器测量过程中的误差控制探讨[J].中国科技纵横,2024(9):91-93.